

Колебания электронного пучка в ускорителях типа ЭЛВ, их диагностика и метод подавления

*Е.В. Домаров**, *Д.С. Воробьев*, *Ю.И. Голубенко*, *А.И. Корчагин*, *Н.К. Куксанов*, *Р.А. Салимов*,
С.Н. Фадеев, *В.Г. Черепков*, *И.К. Чакин*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

**domarov88@mail.ru*

Аннотация. В данной статье описан метод диагностики колебаний электронного пучка в ускорителях типа ЭЛВ связанный с проникновением в ускорительную трубку поперечного магнитного поля от первичной и вторичной обмоток. Был разработан и испытан метод подавления этих колебаний на примере ускорителя ЭЛВ-8 с выпускным устройством способным выводить сфокусированный электронный пучок в атмосферу, после подавления колебаний удалось выпустить сфокусированный электронный пучок мощностью 100 кВт в атмосферу и увеличить ресурс диафрагм.

Ключевые слова: ускоритель ЭЛВ, сфокусированный пучок электронов, колебания электронного пучка.

1. Введение

В ускорителях типа ЭЛВ присутствуют колебания электронного пучка связанные с проникновением поперечного магнитного поля в ускорительную трубку от первичной и вторичной обмоток ускорителя, т.к. ускорительная трубка находится внутри этих обмоток и может быть не соосна или наклонена из-за конструкции ускорителя. Для ускорителей с выпускным устройством раструбного типа данные колебания не критичны. Поскольку в этом случае электронный пучок проходит диафрагму с диаметром отверстия 50 мм, а затем выпускается в атмосферу через титановую фольгу и разворачивается в длину фольги на 1500 мм и в ширину на 70 мм [1]. Но для ускорителей ЭЛВ которые способны выводить сфокусированный электронный пучок в атмосферу, колебания пучка приводят к разрушению диафрагм в системе дифференциальной вакуумной откачки. Их разрушение приводит к ухудшению вакуума в ускорительной трубке, что не допустимо [2, 3].

Поэтому нам необходимо было диагностировать эти колебания и предложить решение для их подавления, чтобы увеличить ресурс диафрагм.

2. Краткое описание устройства ускорителя способного выводить в атмосферу сфокусированный электронный пучок

Общий вид ускорителя ЭЛВ способного выводить сфокусированный электронный пучок в атмосферу представлен на Рис. 1. Внутри котла, заполненного элегазом, расположены первичная обмотка и выпрямительные секции, которые содержат вторичную обмотку ускорителя. Количество секций составляет от 20 до 68 штук в зависимости от требуемой энергии ускорителя. Рабочая частота ускорителя может быть от 400 Гц до 800 Гц. В обмотках секций наводится переменное напряжение с рабочей частотой, которое впоследствии выпрямляется с помощью по схеме удвоения напряжения. Суммарное напряжение колонны выпрямительных секций прикладывается к ускорительной трубке.

В данном конкретном случае использовался ускоритель ЭЛВ-8 с 68 секциями и рабочей частотой 438 Гц, рабочий диапазон энергии данного ускорителя составляет от 1.4–2.5 МэВ, максимальный ток пучка 50 мА и максимальная мощность в пучке 100 кВт.

Оптическая схема выпускного устройства показана на Рис. 2 [2].

Линза $L1$ находится непосредственно на нижнем конце ускорительной трубки. Пройдя линзу $L1$, пучок фокусируется чтобы пройти диафрагму $D6$ диаметром 12 мм, длиной 100 мм, и диафрагму $D5$, которая представляет собой трубку диаметром 10 мм и длиной 200 мм.

Диафрагмы разделяют ступени дифференциальной системы откачки. Для проводки пучка по оси диафрагм имеются катушки коррекции $C1$, $C2$, $C3$.

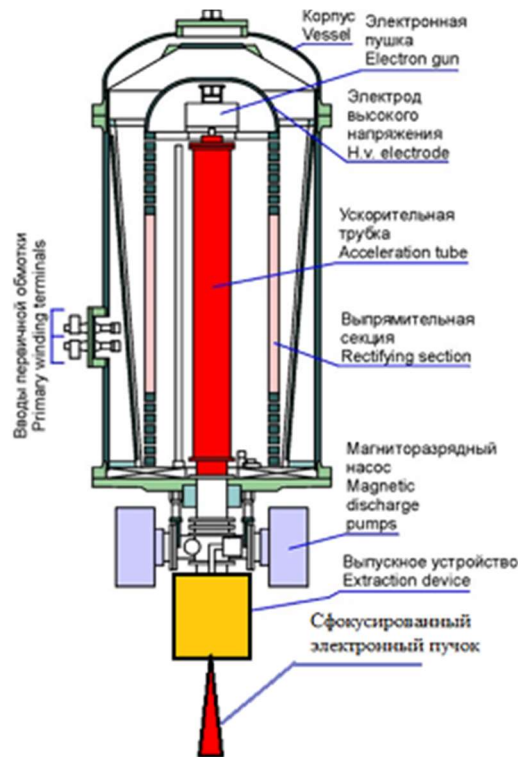


Рис. 1. Общий вид ускорителя ЭЛВ способного выводить сфокусированный электронный пучок в атмосферу

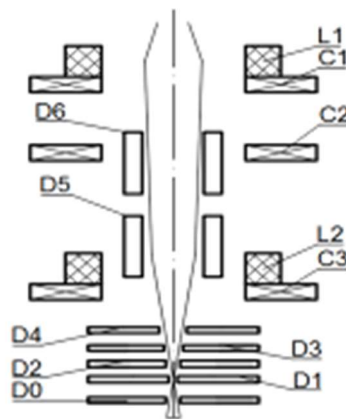


Рис. 2. Оптическая схема выпускного устройства: $D0$ – Дополнительная ступень с диаметром отверстия 5 мм; $D1$, $D2$, $D3$, $D4$ – диафрагмы с отверстиями 2.5; 3; 4 и 4.5 мм соответственно; $D5$ – водоохлаждаемая диафрагма с отверстием диаметром 10 мм и длиной 200мм; $D6$ – водоохлаждаемая диафрагма с отверстием диаметром 12 мм и длиной 100 мм. $C1$, $C2$, $C3$ – катушки коррекции; $L1$, $L2$ – фокусирующие электромагнитные линзы.

Размер отверстий в диафрагмах установлен в соответствии с расчетным значением огибающей пучка. Для этих диаметров отверстий были вычислены натекания воздуха и выбраны насосы для дифференциальной системы откачки, которые обеспечивают возможность получить перепад давлений от атмосферного вне выпускного устройства до 10^{-6} Торр в ускорительной трубке. Линза и катушки коррекции находятся вне вакуумной камеры.

Диафрагма $D5$ охлаждается водой по трубке, впаянной в корпус диафрагмы и рассчитана на отвод мощности порядка 1–1.5 кВт. Диафрагмы $D1$, $D2$, $D3$, $D4$ охлаждаются за счет непосредственного контакта с медным водоохлаждаемым корпусом выпуска. Охлаждение корпуса позволяет отвести мощность до 1–2 кВт, при условии, что каждая из четырех диафрагм принимает мощность до 0.5 кВт. Подробная конструкция выпускного устройства описана в других статьях [2–4].

3. Метод диагностики колебаний электронного пучка

Для анализа колебаний электронного пучка и подавления этих колебаний, а также корректного прохождения электронного пучка по оси выпускного устройства использовалась схема, которая показана на Рис. 3.

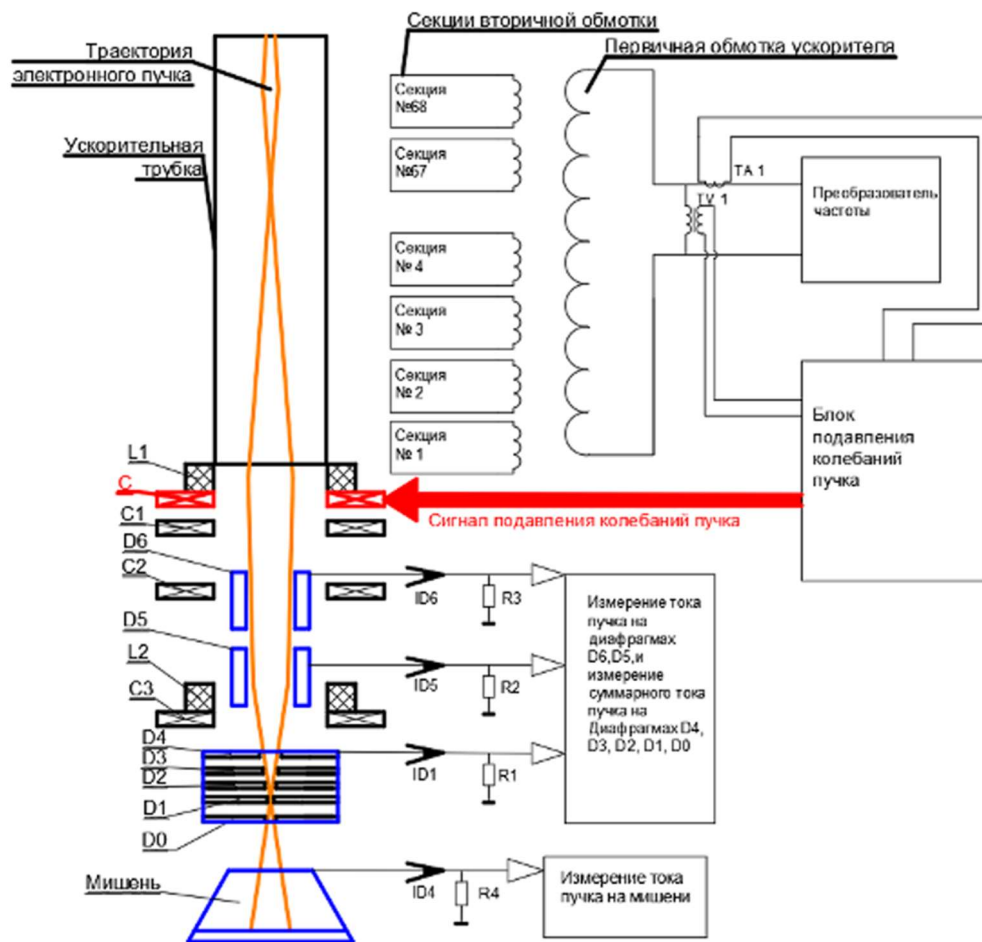


Рис. 3. Схема подавления колебаний: $TA1$ – трансформатор тока; $TV1$ – трансформатор напряжения; C – катушки антиколебаний; $R1$, $R2$, $R3$, $R4$ – измерительные сопротивления; $ID1$ – суммарный сигнал тока диафрагм $D0$, $D1$, $D2$, $D3$, $D4$, вызванного электронами, отклоняющимися от оси; $ID5$ – сигнал тока диафрагмы $D5$, вызванного электронами, отклоняющимися от оси; $ID6$ – сигнал тока диафрагмы $D6$, вызванного электронами, отклоняющимися от оси; $ID4$ – ток мишени.

Диафрагмы $D6$, $D5$ и корпус коробки изолированы от земли с помощью фланцев из капрлона. С резисторов $R3$, $R2$ и $R1$ (смотри Рис. 3) измеряются сигналы оседания токов электронного пучка на диафрагмах и коробке ($ID6$ – оседание тока электронного пучка на диафрагму $D6$, $ID5$ – оседание тока электронного пучка на диафрагму $D5$, $ID1$ – суммарное оседание тока электронного пучка на диафрагмы $D0$, $D1$, $D2$, $D3$, $D4$). Контролировать

отдельно ток каждой из диафрагм D_0 , D_1 , D_2 , D_3 и D_4 не представляется возможным, поскольку они имеют электрический контакт с корпусом выпускного устройства.

Прежде чем начать на ускорителе работы по отработке технологий с применением пучка необходимо было принять пучок, выпущенный в атмосферу на мишень. Эта мишень представляет собой четырехгранную пирамиду. Дно пирамиды охлаждается водой, а боковые стенки защищают окружающие предметы от рассеянных электронов и озона. Озон выводится через отверстие в пирамиде в вентиляцию. Вся пирамида и водоохлаждаемые мишени изолированы от земли через резистор $R_4 = 86$ Ом (Рис. 3). Таким образом, с помощью осциллографа в реальном времени мы можем диагностировать электронный пучок, принимаемый мишенью.

Во время работы ускорителя, были обнаружены колебания электронного пучка связанного с проникновением поперечного магнитного поля от первичной и вторичной обмоток ускорителя, т.к. ускорительная трубка находится внутри этих обмоток и может быть не соосна или наклонена из-за конструкции ускорителя. Сигнал тока пучка с мишени приведен на Рис. 4.



Рис. 4. Осциллограмма сигнала тока с мишени, при токе пучка $I_0 = 15$ мА и энергии пучка $E = 2.5$ МэВ. зеленый луч – полный ток мишени. Ноль для зеленого сигнала на осциллограмме располагается вверху; $\Delta I = 2.3$ мА - величина уменьшения тока мишени. Пик 1 и 2 – это уменьшение полного тока мишени связанного с касанием электронного пучка противоположных сторон отверстий диафрагм.

Из осциллограммы (Рис. 4) видно, что максимальное отношение $\Delta I/I_0 = 2.3\text{мА}/15\text{ мА} = 0.16$, а период между пиками 1 и 2 составляет 1.14 мс или 876 Гц – это соответствует двойной частоте питающего напряжения первичной обмотке. С этой частотой электронный пучок касается диафрагм, и ток мишени уменьшается на величину тока касания диафрагм. Двойная частота получается из-за касания электронного пучка двух сторон диафрагм. При этом интегральные оседания тока пучка на диафрагмы составляют $ID_6 = 0$ мкА, $ID_5 = 20$ мкА, $ID_1 = 600$ мкА. Суммарная мощность оседающего пучка на диафрагмы D_0 , D_1 , D_2 , D_3 , D_4 составляет 1.5 кВт, дальнейшее увеличение тока пучка приведет к разрушению этих диафрагм, а необходимо выпустить электронный пучок в атмосферу величиной 40 мА. Поэтому необходимо уменьшить колебания пучка.

4. Способ подавления колебаний электронного пучка

Для подавления колебаний электронного пучка использовали стандартные катушки коррекций, которые применяются в серийных ускорителях ЭЛВ. Эти катушки «С» (Рис. 3), в дальнейшем будем называть катушками антиколебаний. Они располагаются ниже фокусирующей линзы $L1$. Катушки антиколебаний способны двигать электронный пучок в двух координатах по «X» и «Y», которые расположены под 90° относительно друг друга. Сигналы напряжений, подающиеся на катушки «Ux» и «Uy» измеряли с помощью осциллографа непосредственно на самих катушках. Полное сопротивление катушек при частоте 438 Гц составило 73 Ом по координатам «X» и «Y».

Предварительно была произведена калибровка катушек по диафрагме $D6$ методом касания электронного пучка по уровню 100 мкА [2]. Калибровка этой катушки составила 123 мА/мм, для энергии пучка 2.5 МэВ.

Для полной компенсации колебаний электронного пучка требуется подавить результирующую составляющую поперечного магнитного поля. Фаза этого поперечного магнитного поля определяется фазами первичной и вторичной обмоток, а фазы этих обмоток сдвинуты между собой. В качестве обратной связи подается суммарный корректирующий сигнал на катушки антиколебания: ток первичной обмотки с трансформатора тока $TA1$ и напряжение первичной обмотки с понижающего трансформатора напряжения $TV1$. Суммирование и регулировка этих сигналов осуществляется с помощью лабораторных автотрансформаторов. Что позволило не только менять величину амплитуды тока катушек антиколебания но и менять их фазу по координатам «X» и «Y».

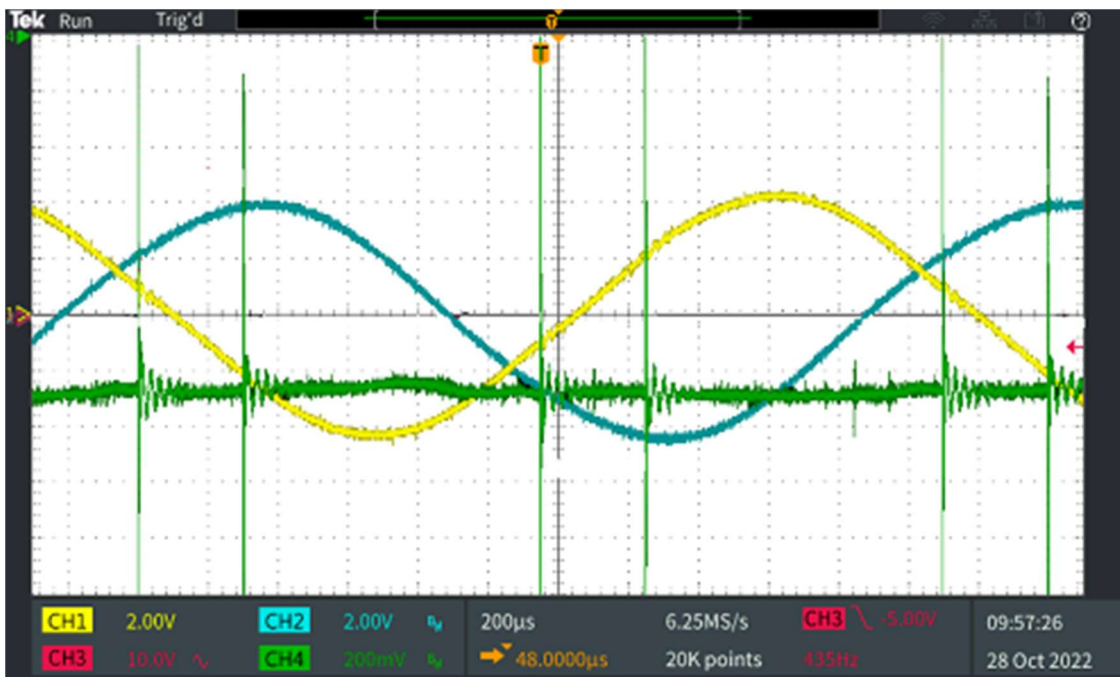


Рис. 5. Осциллограмма подавления колебания пучка с помощью сигналов тока и напряжения первичной обмотки ускорителя при энергии пучка 2.5 Мэв и токе пучка 15 мА, Зеленый луч – полный ток мишени, который соответствует 15 мА, Желтый луч – ток в катушке антиколебаний по координате «X», амплитуда составляет 60 мА, Синий луч – ток в катушки антиколебаний по координате «Y» амплитуда составляет 55 мА.

Осциллограмма подавления колебания электронного пучка с помощью сигналов тока первичной обмотки и напряжения первичной обмотки показана на Рис. 5. из осциллограммы видно, что нам удалось подавить колебания до уровня шумов. При этом амплитуды токов в

катушках антиколебания по координатам «X» и «Y» примерно одинаковы и составляют 60 мА и 55 мА соответственно, а фазы сдвинуты между собой на 120°. С учетом калибровки катушек антиколебаний электронный пучок имеет колебания в диафрагме D_6 по координате «X» составляет $\Delta x = \pm 0.48$ мм, а по координате «Y» составляет $\Delta y = \pm 0.44$ мм. Оседания тока пучка на диафрагмах кардинально уменьшился и составляет $ID_6 = 0$ мкА, $ID_5 = 0$ мкА, $ID_1 = 20$ мкА.

5. Заключение

С подавлением колебания пучка удалось выводить электронный пучок мощностью 100 кВт с минимальными оседаниями тока пучка на диафрагмах. При энергии 2.5 МэВ и токе пучка 40 мА, оседание тока на диафрагмах составило $ID_6 = 0$ мкА, $ID_5 = 30$ мкА, $ID_1 = 50$ мкА. Из-за этого увеличился ресурс диафрагм.

6. Список литературы

- [1] Р.А. Салимов, Мощные ускорители электронов для промышленного применения, *УФН*, **170**(2), 197, 2000; doi: 10.3367/UFNr.0170.200002h.0197
- [2] E.V. Domarov, D.S. Vorobyov, M.G. Golkovsky, Yu.I. Golubenko, A.I. Korchagin, N.K. Kuksanov, A.V. Lavrukhin, P.I. Nemytov, R.A. Salimov, A.V. Semenov, A.V. Sorokin, S.N. Fadeev, I.K. Chakin, V.G. Cherepkov, Research of Parameters of the Powerful Electron Beam of Industrial Accelerator ELV, *Sib. Fiz. Zh.*, **14**(2), 5, 2019; doi: 10.25205/2541-9447-2019-14-2-5-20
- [3] E.V. Domarov, I. Chakin, V.G. Cherepkov, S. Fadeev, M. Golkovsky, Yu.I. Golubenko, A.I. Korchagin, N.K. Kuksanov, A. Lavrukhin, P.I. Nemytov, R.A. Salimov, A.V. Semenov, Upgraded the extraction device of focused electron beam into the atmosphere, *27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021*, 114, 2021; doi: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB03
- [4] E.V. Domarov, Yu.I. Golubenko, N.K. Kuksanov, R.A. Salimov, S.N. Fadeev, I.K. Chakin, Device for creating a pressure differential using differential pumping, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. **63**(1), 41, 2022; doi: 10.1134/S0021894422010072